

基于 OpenFOAM 的低长深比单丁坝绕流数值模拟*

方麟翔, 詹杰民, 李雨田, 范庆

(中山大学应用力学与工程系, 广州, 510275, Email: fanglx5@mail2.sysu.edu.cn)

摘要: 丁坝作为一种重要的水工建筑物, 在保护河岸、保证通航及引流方面具有很高的水利价值。与此同时, 丁坝也存在着一些缺点, 如造成对河床泥沙的冲刷, 下游泥沙的淤积等等。研究丁坝绕流的相干结构为进一步研究丁坝对河床底部的冲刷奠定了基础, 也对设计丁坝具有指导意义。本文基于流体体积法 (VOF) 采用 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型, 通过 OpenFOAM 对单丁坝绕流问题进行了数值模拟, 并采用 Q 准则得到流场中的涡结构。通过与 Jeon 等人的实验对比, 验证了在非淹没式直线型单丁坝绕流中, 中层平面存在着回流涡与角涡, 同时近底面处还存在着马蹄涡结构, 本文的工作, 为设计丁坝结构提供了参考方法。

关键词: 丁坝; RANS; 马蹄涡; 剪切层

1 引言

丁坝绕流问题作为一个比较古老的水力学问题, 对其的研究最早从实验开始。早期的实验受限于实验条件, 只能对水流流动的一些大致的流动情况作出推断, 通过对实验的总结发展出了丁坝水力学的一系列经验公式从而用于设计丁坝的一些参考。随着实验设备和实验技术的提升, 近期也有很多学者通过实验手段对丁坝绕流问题进行实验研究。2009 年, Ghodsian 等^[1]通过声学多普勒测量速度仪 (ADV) 研究 90 度弯折明渠不同佛汝德数、不同丁坝长度及不同翼长 T 型丁坝对冲刷坑形态的影响; 2013 年, 杨石磊等^[2]采用比尺模型实验研究了不同丁坝间距、长度和坝轴线方位角研究了丁坝群局部冲刷规律; 2016 年, Akbar Safarzadeh 等^[3]对直线型、及两种不同翼长的 T 型丁坝的单丁坝绕流进行了研究; 2017 年, Jeongsook Jeon 等^[4]使用 ADV 和微超声波距离传感器测量了流场速度及水面高度, 研究了单丁坝绕流的三维流动结构。另外, 随着数值模拟的发展, 很多学者也开始采用数值模拟的方式对丁坝绕流问题进行了研究。2008 年, 崔占峰等^[5]通过 RNG 紊流模型, 采用不平衡推移质输沙模型模拟了丁坝附近流场及冲刷坑形态; 2010 年, Joongcheol Paik 等^[6]运用 CSR

* 基金项目: 国家重点项目 (6140206040301); 中央高校基本科研业务费专项基金 (No. 171gjc41)

通信作者: 詹杰民, Email: stszjm@mail.sysu.edu.cn

(coherent-structure-resolving) 技术, 采用经过优化的 DES 模型研究了来流流经翼型结构、安装在底部的圆柱型结构及高雷诺数下浅深渠中丁坝结构的马蹄涡系统; 2014 年, Fang 等^[7]采用动态亚格子格式、基于强迫力思想的浸没边界法, 通过大涡模拟研究了丁坝长度与丁坝间距比和丁坝长度对丁坝群周围流动模式等的影响; 2016 年, 李子龙等^[8]通过 S-A 一方程湍流模型, 采用非结构网格对单丁坝绕流在不同 Fr 数下的数值模拟。数值模拟方面的研究主要集中在丁坝长度、丁坝间距和弗洛德数方面的影响, 本文基于 OpenFOAM 对低长深比丁坝绕流问题进行研究, 重点主要放在坝头形状以及不同长度的丁字形丁坝的三维流动结构的研究。其中长深比是指丁坝的横向长度与水深的比, 本文中该值为 1.4。

2 控制方程与湍流模型

丁坝绕流问题满足雷诺平均的连续性与守恒型动量方程

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) - \nabla \cdot \left[(\mu + \mu_t) \left[\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T \right] \right] = -\nabla P + \rho \mathbf{g} + \sigma \kappa \nabla \alpha \quad (2)$$

其中, ρ 为密度. μ 为动力黏性系数. μ_t 为涡黏系数, α 为流体相分数, κ 为曲率, σ 为表面张力系数。 α 是介于 0 到 1 的值, 代表水分在两相中的占比, 相分数方程

$$\frac{\partial \alpha_1}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_1 \mathbf{U}) + \nabla \cdot [\alpha_1 (1 - \alpha_1) \mathbf{U}_r] = 0 \quad (3)$$

其中压缩速度 \mathbf{U}_r 为定义于流动分界面处的速度。Realizable $k - \varepsilon$ 湍流模型的控制方程分别为

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla \cdot (k \mathbf{U}) = \nabla \cdot (\nu_{eff,k} \nabla k) + G_k - \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon \mathbf{U}) = \nabla \cdot (\nu_{eff,k} \nabla \varepsilon) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

及

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla \cdot (k \mathbf{U}) = \nabla \cdot (\nu_{eff,k} \nabla k) + G_k - \varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon \mathbf{U}) = \nabla \cdot (\nu_{eff,k} \nabla \varepsilon) + \frac{\sqrt{2}}{2} C_{1\varepsilon} \left[\nabla \bar{U} + (\nabla \bar{U})^T \right] \varepsilon - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (7)$$

其中, k , ε 分别为湍动能和湍动能耗散率, 其他参数可参照 Launder^[9] 和 Shih^[10] 等的建议。

3 模型验证与讨论

对 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型与 Jeon 等^[4]的实验进行对比进行率定, 结果如图 1 所示, 可以看到在流动特征方面, 表征来流与马蹄涡系统相互作用的流动会聚线 C1 和马蹄涡系统与回流区相互作用的流动发散线 D 的出现, 流动发散线 D 位于回流区的外边沿, 流动发散线 C3 没有出现。流向速度分布区图中, C1 位于流向速度发生扭曲的位置, D 位于流向速度发生急剧变化的位置, 这两个区域的速度梯度的值发生急剧变化, 由于流向速度在湍动能分布中主要起主导作用, 这两条线分别界定了弱剪切层与强剪切层, 直线型丁坝坝头位置具有横向流动速度高速区, 并且在底层平面上具有更大的高速区, 这也从侧面反映了马蹄涡结构在底部区域具有较强的旋转, 中层平面上, 坝头上游位置的竖向速度具有一块向下的流动的区域, 这也与 Safarzadeh 等人^[3]的实验一致, 证实坝头上游下潜流的存在。

为了更好地验证数值模拟的准确性, 分别对 $x/L=-0.9, 1.67, 3.33, 6.67, 10, 13.33$ 六个平面的流动速度进行对比得到图 2, 验证了 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型的高准确性。底层平面上, 流动速度基本一致, 但在 $y/L=2-2.5$ 的位置数值模拟的流向速度出现扭曲, 而实验上的值却没有这个现象, 与图 1 的 (f) (h) 图流向流动速度分布做对比, 可以看出无论是数值模拟还是实验的结果, 流动速度分布在 C1 线上都出现了扭曲, 但这却没有在实验结果上反映出来, 推测这是由于实验在测量速度的时候在横向上没有取到足够多的测点, 在绘制的时候没有反映出来这一点。竖向速度方面由于缺乏实验数据不予比较。底层的横向速度可以看出在曲线的弯折上大致上还是符合的。

经过对实验与数值模拟的对比, Realizable $k-\varepsilon$ 模型在模拟直线型单丁坝绕流问题上具有较高的准确性。基于 Q 准则可以显示主要涡结构, 在算出 Q 值后, 对其进行单位化处理, 取 $Q=0.0001$ 等值面, 并通过速度大小对其进行染色, 结果如图 3 所示, 结果表明在坝头下游处形成一系列涡结构, 这一系列涡结构落在速度大小变化非常剧烈的位置, 也即是强剪切层的位置, 同时可以观察到在丁坝前端马蹄涡系统的形成并向着远离丁坝一侧发展。

4 结论

采用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型, 本文通过 OpenFOAM 对单丁坝绕流进行了数值模拟, 结果表明该模型在丁坝绕流问题上具有较高的准确度。在中层平面上存在着回流区, 同时坝基上下游存在着角涡; 底层平面上可以观察到流动会聚线及发散线的存在, 这从侧面反映出马蹄涡及剪切层等结构的存在; 最后通过 Q 准则进行可视化, 可以观察到马蹄涡的形成与发展趋势。

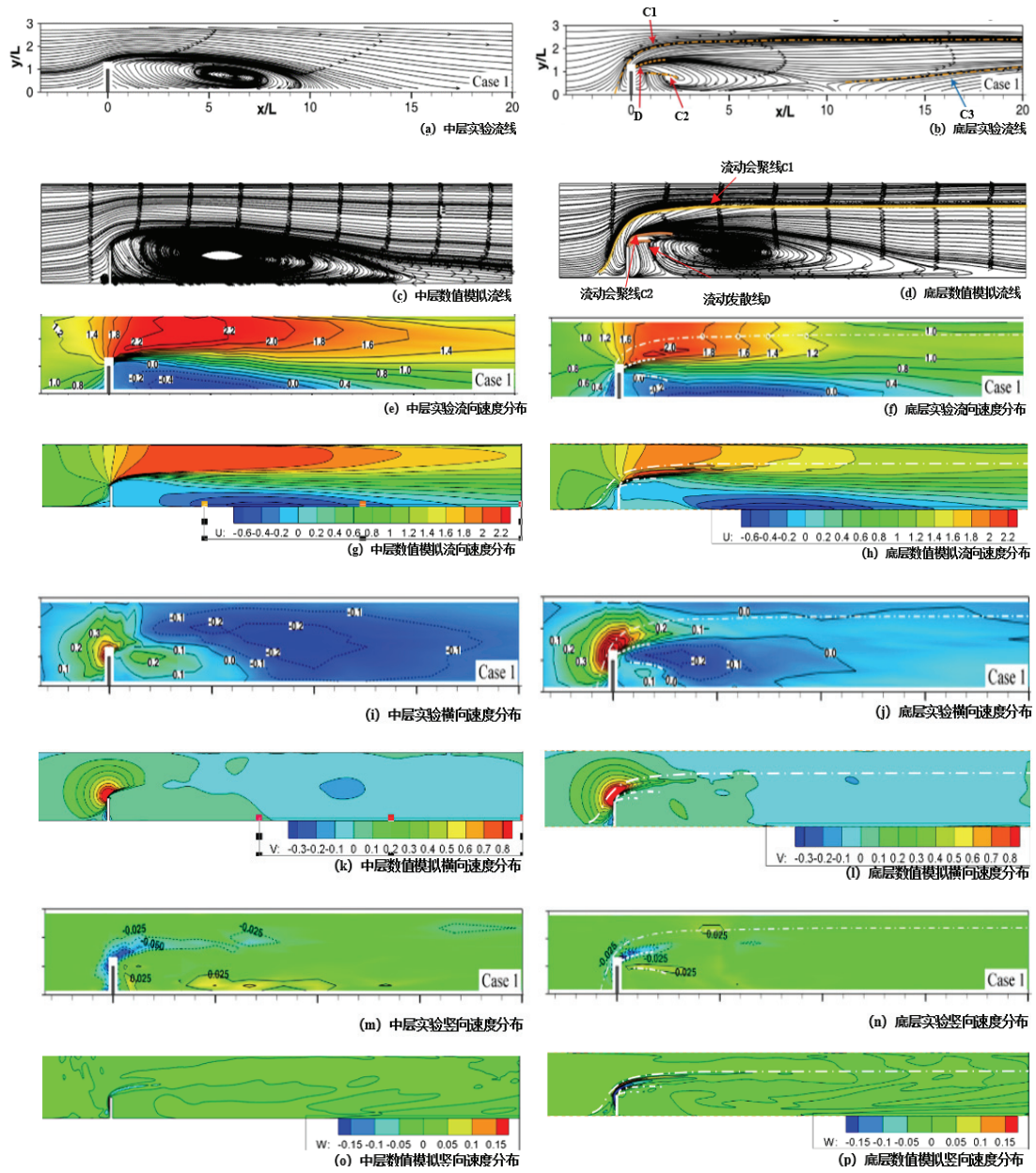


图1 直线型中层(左)与底层平面(右)实验与 Realizable $k-\epsilon$ 模型流线及速度分布对比

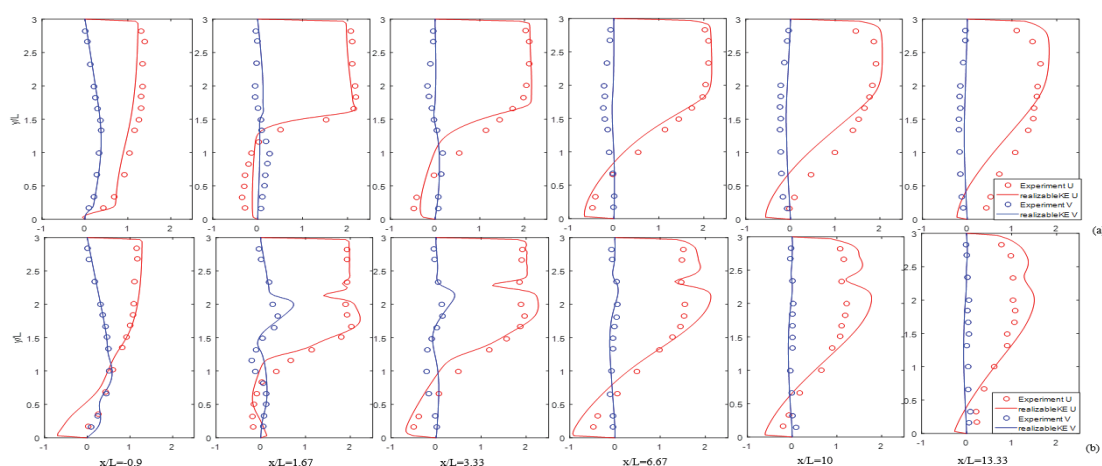


图2 实验与 Realizable $k-\epsilon$ 模型中层(a)与底层(b)流向、横向无量纲速度对比

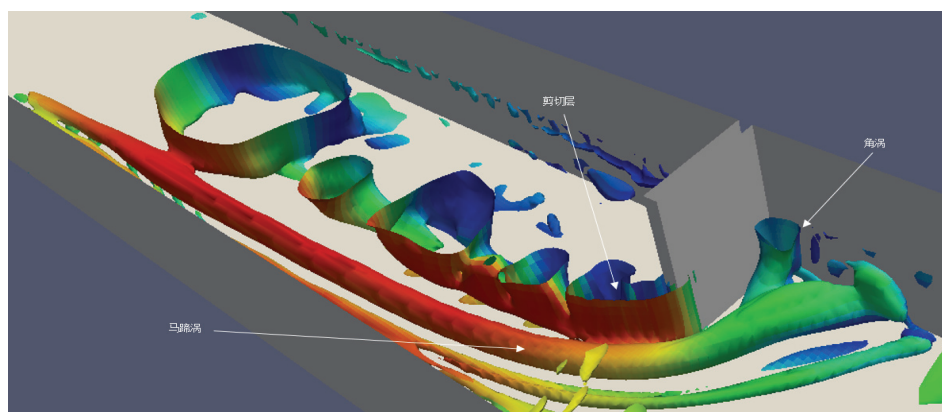


图3 基于 Q 准则的丁坝绕流主要涡结构

参 考 文 献

- 1 Ghodsian M, Vaghefi M. Experimental study on scour and flow field in a scour hole around a T-shape spur dike in a 90° bend[J]. International Journal of Sediment Research, 2009, 24(2): 145-158.
- 2 杨石磊, 张耀哲. 非淹没式丁坝群局部冲刷规律试验研究[J]. 水利水电技术, 2013, 44(11): 81-84.
- 3 Safarzadeh A, Neyshabouri S a a S, Zarrati A R. Experimental Investigation on 3D Turbulent Flow around Straight and T-Shaped Groynes in a Flat Bed Channel[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 142(8): 04016021.
- 4 Jeon J, Lee J Y, Kang S. Experimental Investigation of Three-Dimensional Flow Structure and Turbulent Flow Mechanisms Around a Nonsubmerged Spur Dike With a Low Length-to-Depth Ratio[J]. Water Resources Research, 2018, 54(5): 3530-3556.

- 5 崔占峰, 张小峰, 冯小香. 丁坝冲刷的三维紊流模拟研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2008, (01): 33-41.
- 6 Paik J, Escauriaza C, Sotiropoulos F. Coherent Structure Dynamics in Turbulent Flows Past In-Stream Structures: Some Insights Gained via Numerical Simulation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 136(12): 981-993.
- 7 Fang H, Bai J, He G, et al. Calculations of Nonsubmerged Groin Flow in a Shallow Open Channel by Large-Eddy Simulation[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2014, 140(5): 04014016.
- 8 李子龙, 寇军, 张景新. 明渠条件下单丁坝绕流特征的数值模拟[J]. 计算力学学报, 2016, 33(02): 245-251.
- 9 Launder B E, Spalding D B: The numerical computation of turbulent flows [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1974, 3(2):269-289.
- 10 Shih T-H, Zhu J, Lumley J L. A new Reynolds stress algebraic equation model[J]. Computer methods in applied mechanics and engineering, 1995, 125(1-4): 287-302

Numerical simulation of flow around a single spur dike with low aspect ratio based on OpenFOAM

FANG Lin-xiang, ZHAN Jie-min, LI Yu-tian, FAN Qing

(Department of Applied Mechanics and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou, 515000,

Email: fanglx5@mail2.sysu.edu.cn)

Abstract: As an important hydraulic structure, spur dike has high hydraulic engineering value in protecting river banks, ensuring navigation and drainage. At the same time, spur dike also has some shortcomings, such as causing erosion of riverbed sediments, siltation of downstream sediments, and so on. Studies the coherent structure around the spur dike not only lay the foundation for further studies about the scouring of the riverbed around spur dike, but also have guiding significance for the design of the spur dike. In this paper, based on OpenFOAM, the fluid volume method (VOF) and the Realizable k-epsilon turbulence model are used to simulate the flow around a single spur dike. And the vortex structure in the flow field is illustrated by the Q criterion. Compared with the experimental results of Jeon et al., it is verified that in the flow around non-submerged straight single spur dike, there are recirculation vortices and angular eddies in the middle plane, and there are also horseshoe vortex structures near the bottom surface. The work in this paper provides a reference for the design of spur dike structures.

Key words: spur dikes; RANS; horseshoe vortex; shear layer